

协作多点传输对网络能效性能的影响

薛建彬, 梁波, 秦立静, 赵燕琴

(兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为节省蜂窝网络中的能量并保证用户的服务质量, 需要在能量消耗和延迟之间达到一个折中。采用 M/G/1 队列建模基站的睡眠模式, 通过分析得到能量损耗和平均时延之间的关系, 在此基础上, 演示协作蜂窝网络的能耗函数; 研究平均中断概率约束对网络能耗节省的影响, 以降低网络能耗, 在提高网络性能的前提下, 有效控制传输时延。

关键词: 能量节省; 睡眠模式; 协作; 中断概率; 传输时延

中图分类号: TN915.03 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7024 (2014) 08-2696-04

Effects of coordinated multi-point transmission on performance of network energy efficiency

XUE Jian-bin, LIANG Bo, QIN Li-jing, ZHAO Yan-qin

(College of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To save the energy of the network and to guarantee the service quality of users, a tradeoff between the energy consumption and the delay needs to be reached. BS sleeping pattern was modeled with M/G/1 queue and the energy consumption function of cooperative cellular network was demonstrated by analyzing the relationship between the energy consumption and the average delay. Meanwhile, the effect of an average outage constraint to the energy consumption saving was studied to reduce the network energy consumption and to control the transmission delay effectively on the premise of improving the performance of the network.

Key words: energy saving; sleeping pattern; coordinate; outage constraint; transmission delay

0 引言

在典型的蜂窝网络中, 基站的能耗占整个网络能耗的 60%~70%, 所以无线网络能效地提高主要在于基站的能量节省, 而在无线网络中我们主要考虑基站传输能量的最小化而不是电路所消耗的能量。为此引入了基于睡眠模式的能量节省机制^[1-4]。睡眠模式是一种节省能量有效的方式, 且能够保证相应的服务质量。具体来说, 就是当业务负载小的时候, 通过关闭某些基站的方式来节省能量。在文献 [5] 中, L. Saker 和 T. Chahed 研究了在保证用户可接受的吞吐量的情况下睡眠模式的运作情况。文献 [6, 7] 中牛志升等和 B. Krishnamachari 等分别介绍了蜂窝网络中阻塞概率约束下睡眠模式的运作。M. A. Marsan 和 L. Chiaraviglio 根据确定的业务变化类型给出了一种预定义

的基站睡眠机制^[8]。在此基础上, L. Chiaraviglio 和 D. Ciullo 考虑了相同机制中随机业务到达和中断概率约束的影响^[9]。为了提高蜂窝网络的性能, 在未来系统中将会更多地应用到协作多点传输技术^[10], 以节省整个网络的能量。

本文中, 我们重点研究了蜂窝网络中阻塞概率约束情况下, 能量与延迟的折中和基站协作传输对网络能量节省性能的影响。由于当基站关闭时, 用户必须等待直到基站从睡眠状态中被唤醒, 这样必然会导致长延迟。通过改变传输率, 平均传输功率和平均延迟之间存在一个折中。所以, 我们考虑到基站睡眠模式对蜂窝网络能效的提高和实际存在的网络阻塞情况, 通过关于平均延迟的能效函数去研究网络能量消耗的节省性能。本文中, 我们认为睡眠模式不会影响用户的服务质量。

收稿日期: 2013-09-22; 修订日期: 2013-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61062002)

作者简介: 薛建彬 (1973-), 男, 甘肃白银人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为无线通信理论与技术; 梁波 (1990-), 男, 甘肃陇南人, 硕士, 研究方向为无线通信理论与技术; 秦立静 (1989-), 女, 甘肃定西人, 硕士, 研究方向为无线通信理论与技术; 赵燕琴 (1987-), 女, 甘肃张掖人, 硕士, 研究方向为无线通信理论与技术。E-mail: 645397543@qq.com

1 系统模型建立

考虑在一个典型的六边形蜂窝网络中, 每一个基站位于六边形的中心且基站间的距离为 D 。每个基站的半径为 R , 它是由最大传输功率和路径衰落决定的。用户根据强度为 λ 的泊松分布随意的分布在网络中的。在模型中, 每 3 个相邻的基站构成一个等边三角形, 所以整个网络可以划分为无数个互不重叠的三角形。为了简而又不失一般性, 我们分析相邻的 6 个基站。如图 1 所示, 当网络中用户量较少时, 基站间相互协作。其中当内部 3 个基站 (BS2、BS3、BS5) 休眠时, 由外部 3 个基站 (BS1、BS4、BS6) 对用户服务。假设用户与除了这 6 个基站之外的其它基站有很小的概率建立连接, 这样来保证这个模型是精确的。

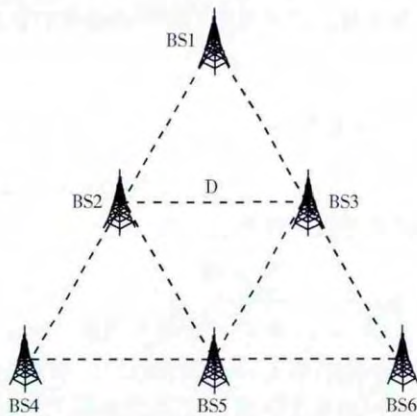


图 1 典型的蜂窝网络拓扑

基站能量的损耗主要是由基站激活运行时所消耗的能量决定的, 所以每个基站的能量损耗可以模型化为

$$E_{bs} = \begin{cases} E_{on} & \text{当基站激活时} \\ 0 & \text{当基站关闭时} \end{cases} \quad (1)$$

当基站关闭时我们认为基站所损耗的能量是可以忽略的, 近似为 0。当然, 用户与基站建立连接的时候也存在一定的中断可能, 我们用 p_{on} 表示基站处于打开状态时的概率。那么平均每个单位区域的能量损耗可以表示为

$$E_{ave} = \sum p_{on} E_{on} / A \quad (2)$$

式中: A ——系统模型中所述三角形的面积。

2 基站睡眠模式分析

我们把基站模型化为关于关闭时间和打开时间的 $M/G/1$ 队列, 用户是以参数为 λ 的泊松分布到达, 服务时间服从期望为 $1/\mu$ 的一般分布, 当在关闭时间内没有用户到达时, 基站进入休眠模式; 当有新的用户在关闭时间到达时, 服务器不通过建立而直接对用户进行服务。在睡眠时期内, 当有 N 个用户请求服务时, 服务器开始建立并开始对用户进行服务。本文中, 我们考虑用户从基站关闭状态到服务器建立的平均等待时间对能量函数的影响。

一般情况下, 由于在关闭时间到达的用户不需要服务器的建立而由服务器直接进行服务, 所以关闭时间越长, 用户的等待时间就越短, 也就避免了频繁的模式转换。可是与服务器没有用户到达就直接进入睡眠模式的情况相比, 较长的关闭时间也将导致更多的基站能耗。另一种有效的方式是只要到达客户多于一个时就使基站打开, 这样也可以避免频繁的基站模式转换, 从而降低能量花费。但这也可能导致更长的延迟。

在关于关闭时间和建立时间的 $M/G/1$ 队列中, 从一次服务到下一次服务的平均时间长度为

$$L_{ave} = \frac{(1-\rho + \lambda E[T_B])}{\lambda(1-\rho)} - \frac{\tilde{D}(\lambda)((1-\rho)(1-N) + \tilde{D}(\lambda)(E[T_B] - E[T_S] - NE(T_B)))}{\lambda(1-\rho)} + \frac{\tilde{D}(\lambda)(E[T_B] - E[T_S] - NE(T_B))}{(1-\rho)} = \frac{1 - \tilde{D}(\lambda)}{\lambda(1-\rho)} + \frac{\tilde{D}(\lambda)(N + \lambda E[T_S])}{\lambda(1-\rho)} \quad (3)$$

式中: T_B 、 T_S 、 T_D ——服务时间、服务器建立时间和关闭时间。 $\tilde{D}(\lambda)$ ——在关闭时间没有用户到达的概率, 且 $\rho = \lambda E[T_B]$ 。

对上式进行 LS 变换, 我们可以得到客户的停留时间, 它既包括客户的等待时间和对客户的服务时间

$$\tilde{T}(s) = \frac{\tilde{B}(s)}{L_{ave}} \left\{ \frac{1 - \tilde{D}(\lambda)}{\lambda} + \frac{(1 - \tilde{D}(\lambda))(1 - \tilde{B}(s))}{[s - \lambda + \lambda \tilde{B}(s)]} \right\} + \tilde{D}(\lambda) \left[\frac{N \tilde{S}(s)}{\lambda} \frac{[\lambda/(s + \lambda)]^N - [\tilde{B}(s)]^N}{\lambda/(s + \lambda) - \tilde{B}(s)} + \frac{1 - \tilde{S}(s)(\tilde{B}(s))^N}{s - \lambda + \lambda \tilde{B}(s)} \right] \quad (4)$$

式中: $\tilde{B}(s)$ 、 $\tilde{S}(s)$ 、 $\tilde{D}(s)$ ——服务时间、服务器建立时间和关闭时间的 LS 变换形式, 那么让上式中 $s=0$ 我们可以得到平均等待时间

$$T_{ave} = \frac{\lambda E[T_B^2] + 2E[T_B](1-\rho)}{2(1-\rho)} + \frac{\tilde{D}(\lambda)[N(N-1) + 2N\lambda E[T_S] + \lambda^2 E[T_S^2]]}{2\lambda[\tilde{D}(\lambda)(N + \lambda E[T_S]) + 1 - \tilde{D}(\lambda)]} \quad (5)$$

我们用 E_{ON} 表示基站打开时单位时间内所消耗的能量, E_{SL} 表示基站睡眠时单位时间内所消耗的能量, E_{ST} 表示基站建立阶段单位时间内所消耗的能量, E_{CD} 表示基站关闭阶段单位时间内所消耗的能量。则基站的平均消耗的能量为

$$E_{ave} = \frac{1}{\lambda L_{ave}} [(1 - \tilde{D}(\lambda))(E_{CD} - E_{SL}) + \lambda \tilde{D}(\lambda) E(T_S)(E_{ST} - E_{SL})] + (1 - \rho) E_{SL} + \rho E_{ON} \quad (6)$$

下面我们考虑平均消耗的能量与平均等待时间之间的关系。从式 (5) 中可以得到 $\tilde{D}(\lambda)$ 关于平均等待时间 T_{ave} 的表达式, 将其带入式 (6) 中就得到了 T_{ave} 与 E_{ave} 之间的线性关系

$$E_{ave} = \rho E_{ON} + (1 - \rho) \{ E_{CD} + \frac{2\lambda[E[T] - E[T_B] - \lambda E[T_B^2]/2(1-\rho)]}{\lambda^2 E[T_S^2] + \lambda 2NE[T_S] + N(N-1)} \} \times$$

$$[\lambda E[T_s](E_{ST} - E_{SL}) - (N + \lambda E[T_s])(E_{CD} - E_{SL})] \quad (7)$$

由于当平均关闭时间增加时，在关闭时间没有用户到达的概率将减少。所以从式 (5) 我们可以得到平均等待时间随平均关闭时间减小，而从式 (6) 得到平均消耗的能量将随平均关闭时间增加。

3 中断概率分析

中断的发生一般是由于以下 2 个原因：①接受信号的强度比预先设置的阈值小，即信号强度中断；②当用户请求服务的时候没有相应的可用服务信道，即服务阻塞。

如前面系统模型所示，在蜂窝网络任意一点 $X = (x, y)$ 处，平均中断概率为

$$p_{ave} = \frac{\iint_D p(x, y) dx dy}{S} \quad (8)$$

式中： S ——基站所能覆盖最大范围的面积。

本文中，我们模型化基站的信道增益为 $d_i^{-\alpha} 10^{\xi_i/10}$ ，其中信号的衰减因子为 $d_i^{-\alpha}$ ，阴影衰落为 $10^{\xi_i/10}$ ， ξ_i 服从对数分布 $N(0, \sigma^2)$ 。假设每个基站的衰落是独立的，则 ξ_i 为独立同分布。我们还要假设每一点的加性噪声水平相同并有相应的机制保证足够的接收信号强度。下面我们在 2 种不同的中断情况下分析基站协作机制下的中断概率约束。

3.1 信号强度中断

我们用 P_t 表示每个基站的功率， h 表示接收信号功率的阈值， I_i 表示基站 i 的状态，打开时为 1，关闭时为 0。则在以下 2 种策略下，信号强度中断概率的表达式为

$$p(x) = \begin{cases} \prod_{i=0}^5 P_t(d_i^{-\alpha} 10^{\xi_i/10} \leq \gamma)^{I_i}, & \text{单基站} \\ P_t(\sum_{i=0}^5 I_i d_i^{-\alpha} 10^{\xi_i/10} \leq \gamma), & \text{基站协作} \end{cases} \quad (9)$$

3.2 服务阻塞中断

一般地，我们采用 $M/M/N(0)$ 队列分析服务阻塞中断的概率。系统模型中所述三角形的面积为 $A = \sqrt{3}D^2/4$ ，当呼叫服务时，是以到达率为 λA 的泊松过程产生，实际上它并不是真正的到达率。假设实际到达率为 λ^* ，则根据 Erlang-B^[11] 公式可得服务阻塞概率为

$$P_b = \frac{a^s}{s! \sum_{j=0}^s a^j / j!} \quad (10)$$

其中， $a = \lambda^* / \mu$ ， $s = km + ln$ 。 m 和 n 分别表示外部基站和内部基站所能提供的无线信道数量， k 和 l 分别表示激活的外部基站和内部基站的数目。实际上，2 种传输情况的服务中断概率是由于实际到达率的不同而不同，因此不同策略下实际的到达率为：

(1) 当单个基站传输时，用户在 x 位置遭受深衰落的

概率为 $p^{(v)}(x)$ ，我们用 v 区分不同传输场景，则我们可以得到实际的到达率为

$$\lambda^* = \int_{x_2} \int_{x_1} (1 - p^{(v)}(x)) \lambda dx_1 dx_2 = \lambda(A - \overline{A p^{(v)}(x)}) \quad (11)$$

(2) 当基站协作传输时，将有多个基站同时为用户服务，为了节约无线资源并节约能耗，同时服务的基站数量应该尽量小，我们用 t 表示这个最小服务基站数量，则实际的到达率为

$$\lambda^* = \int_{x_2} \int_{x_1} \lambda (1 - p^{(v)}(x)) (\sum_{t=1}^{k+1} t p_t(x)) dx_1 dx_2 \quad (12)$$

式中： $p_t(x)$ ——用户在位置 x 出被最少数量基站服务的概率。

通过以上分析，我们得到了 2 种不同传输情况下的中断概率。又由于信号强度中断和服务阻塞中断的发生是相互独立的，因此我们可以得到平均中断概率的表达式为

$$P_{kl}^{(v)} = P_b + \overline{p^{(v)}} - P_b \overline{p^{(v)}} \quad (13)$$

4 能量节省性能分析

我们用集合 $\{k, l, v\}$ 描述不同的场景，则对平均每个单位区域的能量损耗的衡量变为

$$\sum_{k,l,v} p_{kl}^{(v)} E_{kl} / A \quad (14)$$

式中： E_{kl} ——由 kE_{out} 和 lE_{in} 两部分组成，由系统模型可知，每个激活的基站都会在周围的 6 个三角形中充当内部基站或是在不同的 6 个三角形中充当外部三角形，所以我们可以得到关系 $6(E_{out} + E_{in}) = E_{on}$ 。且当外部基站服务周围 6 个三角形时，内部基站只服务 2 个相应的三角形，由此我们可以近似得到 $3E_{out} = E_{in}$ 。这样， E_{kl} 可以表示为

$$E_{kl} = (\frac{k}{24} + \frac{l}{8}) E_{on} \quad (15)$$

实际上，蜂窝网络中存在最大平均中断约束条件来约束蜂窝网络中的中断，我们可以用 η_h 表示，这样我们得到一个约束条件

$$\sum_{k,l,v} p_{kl}^{(v)} P_{kl}^{(v)} \leq \eta_h \quad (16)$$

另外 $p_{kl}^{(v)}$ 也有对自身的限制，我们期望外部基站和内部基站的数目应该相等，这样我们得到另一个约束条件

$$\sum_{k,l,v} k p_{kl}^{(v)} = \sum_{k,l,v} l p_{kl}^{(v)} \quad (17)$$

通过以上分析，我们将问题公式化为一个线性规划问题。如下

$$\begin{cases} \min \sum_{k,l,v} p_{kl}^{(v)} E_{kl} / A \\ \sum_{k,l,v} p_{kl}^{(v)} P_{kl}^{(v)} \leq \eta_h \\ \sum_{k,l,v} k p_{kl}^{(v)} = \sum_{k,l,v} l p_{kl}^{(v)} \\ \sum_{k,l,v} p_{kl}^{(v)} = 1 \\ p_{kl}^{(v)} \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

通过解决这个线性规划问题, 我们可以在得到能量与延迟之间的折中数量关系, 并且得到 2 种情况下最小能量损耗的优化结果, 比较其性能。

5 数值结果分析

这一部分我们将演示用户数量对基站性能和能量节省的影响, 也将用数值结果表示能量与延迟之间的折中, 最后我们还将表明能量节省性能是怎样被网络参数业务负载影响的。在所有的数值结果中, 用户是以 λ 的泊松分布到达的, 基站的数据传输率为 μ 。本文中, 我们设定路径损耗指数为 $\alpha = 3.5$, 最大平均中断约束为 $\eta_m = 2\%$, 内部和外部基站所提供的信道数量分别为 12 和 4, 基站的传输半径 $R = 500m$ 。基站建立和关闭阶段所消耗的能量是基站打开时的 0.9 倍, 而基站睡眠时的能量损耗是打开时的 0.2 倍。

图 2 描述了平均等待时间和消耗能量之间的关系, 我们观察到对于不同的 N , 平均等待时间和消耗能量之间都是线性关系, 当平均等待时间增加时, 所消耗的能量也将大幅度的减少。当用户数越少时, 平均等待时间也就越小。

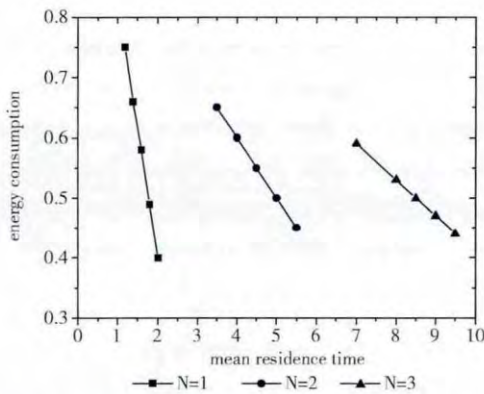


图 2 平均等待时间与平均能量损耗的关系

图 3 描述了不同参数情况下, 平均等待时间与消耗能量之间的关系。我们可以看到当 N 较大时, 虽然能量的消耗也相对较少, 但是也会增加不必要的时间延迟, 当 N 较小时, 能量的消耗较大, 平均等待时间也较短。也就是说随着用户数的增加睡眠模式所带来的益处也就越大, 能量节省也就越多, 当然等待时间也会相对增加。同时, 平均能量损耗并不是平均等待时间的单调递减函数, 它们之间不是线性关系。

根据系统模型我们定义网络密度比 ρ , 它表示基站覆盖的最大范围与蜂窝小区面积的比值

$$\rho = \frac{\pi R^2}{\sqrt{3}D^2/2} \quad (19)$$

图 4 展示了网络密度比为 3 的情况下业务负载与平均能量损耗之间的关系。由图可知, 当业务负载较低时, 基站协作传输所消耗的能量相对小于单个基站传输时的能量

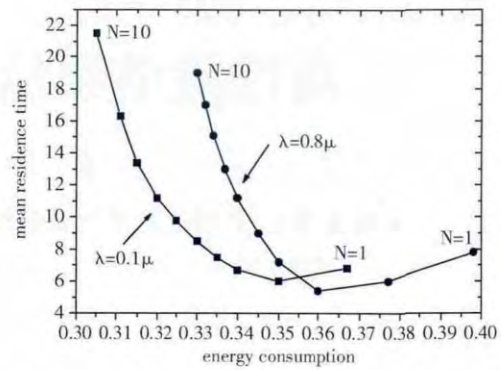


图 3 相对平均停留时间的平均能量损耗

消耗, 单个基站传输给网络带来的能量节省很小, 而基站协作传输由于它的分集作用所带来的能量节省较大。可是当业务负载升高时, 2 种传输策略所带来能量消耗也快速增加, 但是基站协作传输所消耗的能量增加较快, 随着业务负载越来越高, 2 种策略所消耗的能量将慢慢接近。也就是说, 高负载情况下基站协作传输所带来的能量节省将减少。

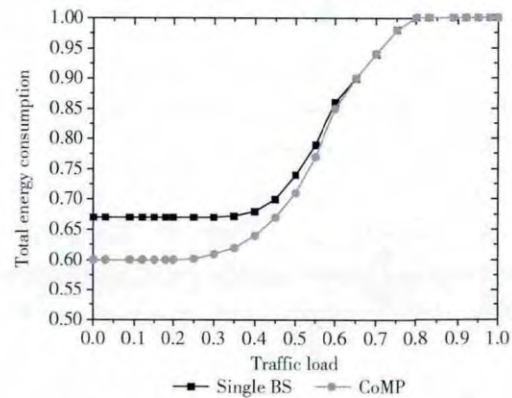


图 4 业务负载与总能量损耗之间的关系

6 结束语

本文中, 我们用 M/G/1 队列来建模基站的睡眠模式, 通过分析得到了平均能耗与延迟之间的关系, 发现低用户数时平均消耗能量随着平均等待时间线性变化。随着用户数量增加, 平均消耗的能量将减少, 当用户数量增大到一定程度时, 这种线性关系将不再成立。同时, 我们还分析了平均中断概率约束条件下, 基于睡眠模式的网络能量节省性能, 并对比了单个基站传输和基站协作传输时不同的能量节省性能。当基站密度增大时, 网络的能量节省性能将降低, 基站协作所带来的收益也将减少。通过本文的讨论, 使基站在某些时间段内关闭, 并采用基站协作传输策略可以降低网络能量的消耗。同时, 限制相应的网络延迟可以确保用户能够在他们容忍的延迟内接受更好的服务, 并且节省更多的能量, 提高网络的能效。

(下转第 2727 页)

- in WSN [D]. Jilin: Jilin University, 2012 (in Chinese). [杨代亮. WSN 中节能路由算法的研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2012.]
- [6] LIN Shaoqin. The research of energy efficiency about wireless sensor networks with hierarchy [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012 (in Chinese). [林少钦. 分簇无线传感器网络的能量有效性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.]
- [7] CHEN Lei. Research on algorithms for topology control in heterogeneous wireless sensor networks [D]. Suzhou: Soochow University, 2011 (in Chinese). [陈雷. 异构无线传感器网络的拓扑控制算法研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2011.]
- [8] ZHANG Ruihua, JIA Zhiping. System design based on energy efficiency in wireless sensor networks [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2010, 1 (1): 7-12 (in Chinese). [张瑞华, 贾智平. 无线传感器网络基于能量效率的系统设计 [J]. 小型微型计算机系统, 2010, 1 (1): 7-12.]
- [9] ZHANG Jun, XIANG Yu, WANG Wenyong. Research on power state transition model wireless sensor network node [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38 (4): 596-599 (in Chinese). [张骏, 向渝, 汪文勇. 无线传感器网络节点能耗状态转换模型研究 [J]. 电子科技大学学报, 2009, 38 (4): 596-599.]
- [10] ZHANG Jun, XIANG Yu, WANG Wenyong. Research on power state transition model wireless sensor network node [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38 (4): 596-599.
- [11] YUE Haibing, GE Hongwei. Clustering algorithm for heterogeneous sensor network based on energy distribution [J]. Computer Engineering, 2010, 36 (1): 118-120 (in Chinese). [岳海兵, 葛洪伟. 基于能量分布的异构传感器网络分簇算法 [J]. 计算机工程, 2010, 36 (1): 118-120.]

(上接第 2699 页)

参考文献:

- [1] WU Y, Fahmy S, Shroff N B. Optimal sleep wake scheduling for time-synchronized sensor networks with QoS guarantees [J]. IEEE IACM Trans Networking, 2009, 17 (5): 1508-1521.
- [2] Kim J, Lin X, Shroff N B, et al. Minimizing delay and maximizing lifetime for wireless sensor networks with any cast [J]. IEEE IACM Trans Networking, 2010, 18 (2): 148-164.
- [3] Balasubramanian N. Energy consumption in mobile phones: A measurement study and implications for network applications [C] //ACM IMC, 2009: 4-6.
- [4] Son K, Kim H, Yi Y, et al. Base station operation and user association mechanisms for energy-delay tradeoffs in green cellular networks [J]. IEEE JSAC, 2011, 29 (8): 1525-1536.
- [5] Elayoubi S-E, Saker L, Chahed T. Optimal control for base station sleep mode in energy efficient radio access networks [C] //IEEE INFOCOM, 2011: 106-110.
- [6] Gong J, Zhou S, Niu Z. A dynamic programming approach for base station sleeping in cellular networks [J]. IEICE Trans Commun, 2012 (2): 551-562.
- [7] Oh E, Krishnamachari B. Energy savings through dynamic base station switching in cellular wireless access networks [C] //IEEE GLOBECOM, 2010: 1-5.
- [8] Marsan M A, Chiaraviglio L, Ciullo D, et al. Optimal energy saving in cellular access networks [C] //Proc IEEE ICC, 2009: 112-113.
- [9] Chiaraviglio L, Ciullo D, Meo M, et al. Energy-aware UMTS access networks [C] //Proc WPMC, 2008: 533-535.
- [10] Huang H, Trivellato M, Hottinen A, et al. Increasing downlink cellular throughput with limited network mimo coordination [J]. IEEE Trans Wireless Comm, 2009, 8 (6): 2983-2989.
- [11] Kleinrock L. Queueing systems [M]. New York: Theory, John Wiley & Sons, 1975.